ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1997
Seria: MECHANIKA z. 128 Nr kol. 1372

Krzysztof JANERKA, Stanisław JURA, Zbigniew PIĄTKIEWICZ, Henryk SZLUMCZYK
Politechnika Śląska, Gliwice

SZYBKOŚĆ NAWĘGLANIA W PROCESIE PNEUMATYCZNEGO WPROWADZANIA MATERIAŁU WĘGLOWEGO

Streszczenie. W artykule przedstawiono mechanizm nawęglania ciekłego metalu przy pneumatycznym wprowadzaniu sproszkowanego grafitu do kąpieli metalowej. Podjęto również próbę obliczenia szybkości nawęglania w zależności od parametrów strumienia dwufazowego.

RECARBURIZATION RATE DURING INJECTION A CARBON AGENT BY MEANS OF PNEUMATIC PROCESS

Summary. The article presents a mechanism of the liquid metal recarburisation with application of a pneumatic method of a powdered graphite injection into the liquid metal. There were undertaken trials of the recarburisation rate calculation in relation to a diphase stream parameters.

1. Szybkość nawęglania

Analizując przebieg reakcji metalurgicznych konieczne jest rozpatrzenie szybkości przebiegu reakcji w celu określenia czasu dochodzenia układu w pobliże stanu równowagi lub przynajmniej w celu poznania czynników, które mogą sprzyjać jego przyspieszeniu. Przy obecnej znajomości bardzo skomplikowanego rzeczywistego przebiegu reakcji często możliwe jest tylko ustalenie czynników, które powodują jej przyspieszenie.

Nawęglanie jest procesem rozpuszczania węgla ze stałego nawęglacza w ciekłym żelazie. Jest więc procesem heterogenicznym, który składa się z etapów następujących po sobie w określonej kolejności, a mianowicie [1]:

- wydzielanie węgla z nawęglacza i powstawanie granicznej warstwy przy powierzchni nawęglacza,
- dyfuzyjne przemieszczanie węgla poprzez warstwę graniczną przyległą do nawęglacza,
- doprowadzenie węgla w głąb ciekłego metalu.

Decydujący wpływ na szybkość rozpuszczania w układzie heterogenicznym ma szybkość najpowolniejszego procesu, którym w rozpatrywanym przypadku jest dyfuzja węgla poprzez graniczną warstwę przyległą do nawęglacza.

Rozważając przebieg zjawisk wymiany składników między dwoma fazami wykorzystuje się często model warstw granicznych Nernsta. W wielu opracowaniach cytuje się wzór obrazujący wpływ niektórych czynników na szybkość zmiany stężenia składników reagujących faz [2]

$$\frac{dC}{dt} = \frac{D_c}{\delta} \cdot \frac{F}{V}(C_{max} - C) = k_c(C_{max} - C), \tag{1}$$

gdzie: C - stężenie węgla w ciekłym metalu w %, C_{max} - stężenie węgla odpowiadające stanowi nasycenia w danych warunkach w %, D_c - współczynnik dyfuzji w $m^2 s^{-1}$, F - powierzchnia styku faz w m^2, V - objętość fazy, w której zachodzi zmiana zawartości składnika w m^3, δ - grubość przypowierzchniowej warstwy dyfuzyjnej w m, k_c - współczynnik wymiany masy między nawęglaczem a naweglanym metalem (stała nawęglania).

W prowadzonej analizie teoretycznej procesu nawęglania [3, 4] wykazano, że zamiast stężeń molowych można z dużym przybliżeniem stosować stężenia wagowe. Całkując równanie (1) otrzymano wzór:

$$C = C_{max}[1 - \exp(-k_c \tau)], \tag{2}$$

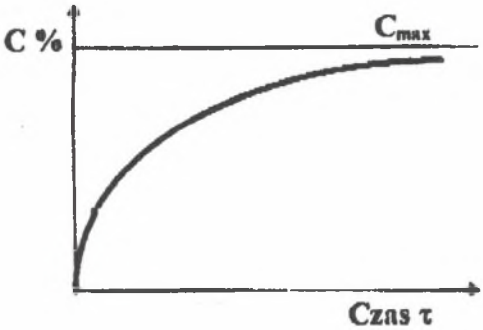
gdzie

$$k_c = \frac{D_c F}{\delta V} = k_t \frac{F}{V}. \tag{3}$$

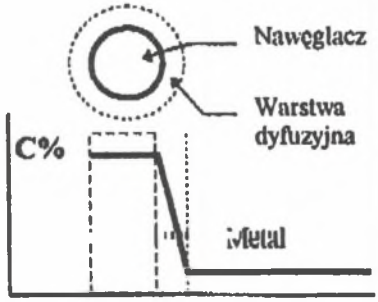
Wykresem zależności równania (2) jest krzywa wykładnicza przedstawioną na rys.1. Jak widać z wykresu, nawęglanie stopu żelaza przebiega początkowo szybko, a następnie w miarę wzrastania stężenia węgla w stopie prędkość nawęglania maleje, ustając praktycznie po przekroczeniu długiego czasu. Na rys. 2 przedstawiono również profil stężenia węgla w ciekłym metalu.

Jeżeli nawęglanie przebiega w warunkach zapewniających niezmienność współczynnika k_c w czasie, to prędkość nawęglania stopu w danym momencie jest tym większa, im większe jest stężenie nasycenia C_{max}, które w technicznych stopach żelaza z węglem maleje z obniżaniem temperatury, ze

Właściwe rysunki



Rys. 1. Krzywa nawęglania
fig. 1. Recarburisation Curve



Rys. 2. Profil stężenia węgla w metalu
fig. 2. Carbon concentration profile in metal

warunkach stopniowo zmniejszającej się współczynnika k_c. W przypadku gdy nawęglacz zawiera większą ilość popiołu i nawęglanie odbywa się w warunkach uniemożliwiających jego usuwanie z powierzchni nawęglacza, wówczas w miarę rozpuszczania się węgla zmniejsza się aktywna powierzchnia. Podobne stwierdzenie dotyczy również przypadku nawęglania przebiegającego powierzchni w warunkach nawęglacza czystego wskutek jego zużywania się. Decydujący wpływ na ten współczynnik posiada stosunek powierzchni styku faz - między którymi zachodzi wymiana składników - do ich objętości. Zmieniając ten stosunek, można w istotny sposób przyspieszać przebieg reakcji. Jednocześnie widać, że mała jego wartość może wywierać hamujący wpływ na wymianę składników. Przyjmując, że zmniejszenie powierzchni międzyfazowej odbywa się według krzywej wykładniczej, można napisać [1]:

$$F = F_o \exp(-a\tau), \tag{4}$$

gdzie: F - powierzchnia międzyfazowa w m^2, F_o - powierzchnia międzyfazowa w momencie rozpoczęcia nawęglania w m^2, a - współczynnik proporcjonalności, będący miarą prędkości zmiany powierzchni międzyfazowej w s^{-1}, τ - czas nawęglania w s.

Zastosowanie metod, w których zwiększa się stosunek powierzchni styku do objętości roztworu (do takich należy bez wątpienia metoda wdmuchiwania sproszkowanych materiałów do ciekłego metalu), pozwala na istotne zwiększenie szybkości przebiegu reakcji metalurgicznych.

Analizując wzór (1), można zauważyć, że na szybkość zachodzenia reakcji mają również wpływ: szybkość dyfuzji i grubość przypowierzchniowej warstwy dyfuzyjnej.

Szybkości dyfuzji składników ciekłych faz są małe, a drogi dyfuzji często dość znaczne. Możliwość przyspieszenia dyfuzji przez zmianę temperatury ze względu na ograniczone możliwości zmian temperatur procesów metalurgicznych jest nieznaczna. Można natomiast dążyć

do zmniejszenia dróg dyfuzji przez nadanie ruchu ciekłej fazie, w której i między którą przebiega wymiana składników (rys. 2. - warstwa dyfuzyjna). Doprowadzenie reagujących składników w sąsiedztwo granic faz i odprowadzenie produktów reakcji z miejsca jej przebiegu odgrywają istotną rolę w szybkości całego procesu.

Stosując wymuszony ruch ciekłego metalu można więc w wyraźny sposób wpłynąć na przyspieszenie przebiegu reakcji metalurgicznych.

2. Przepływ strumienia dwufazowego gaz-proszek w ciekłym metalu

Zagadnieniami tymi zajmuje się wielu autorów. Najczęściej prowadzone są badania modelowe na różnych cieczach, gazach i wprowadzanych materiałach [5, 6, 7]. Uzyskane wyniki za pomocą liczb kryterialnych są przenoszone na ciekły metal. Coraz częściej spotyka się w analizie tych parametrów metody numeryczne i symulację komputerową zjawisk zachodzących przy wprowadzaniu sproszkowanych materiałów w strudze gazu nośnego do cieczy na podstawie wcześniej prowadzonego modelowania fizycznego [8].

Obserwując strumień gazu lub mieszaniny gazu z proszkiem wprowadzanym do kąpieli metalowej prawie wszyscy autorzy wyróżnili dwa stany przepływu: barbotaż i przepływ strumieniowy. Pierwszy jest charakterystyczny dla małych natężeń przepływów materiału i prędkości wylotowych z lancy. Transport masy odbywa się jedynie na powierzchni pęcherzy, które ulegają deformacji i rozpadowi dopiero pod samą powierzchnią ciekłego ośrodka, do którego są wprowadzane. Drugi stan jest charakterystyczny dla dużych natężeń przepływu materiału i prędkości wylotowych z lancy. Deformacja i rozpad dużych pęcherzy występuje już na wylocie z lancy, przez co zwiększa się powierzchnia reakcji cieczy z wprowadzanym stałym materiałem. Jest to przypadek znacznie korzystniejszy od barbotażu i należy dążyć do osiągnięcia na wylocie z lancy parametrów zapewniających przepływ strumieniowy. Trudność rozwiązania zagadnienia wynika z braku wyraźnej granicy rozdziału tych dwóch stanów, stąd istnieje wiele teorii dotyczących wielkości tych parametrów i powiązania ich z różnymi liczbami kryterialnymi.

Farias i Robertson do analizy charakteru strumienia wprowadzają liczbę przepływu N_E, będącą iloczynem poszczególnych składników [9]:

$$N_E = \frac{3}{8} \cdot \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_g} \cdot \frac{h}{r} \cdot \frac{r}{r_c} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_l}, \tag{5}$$

gdzie: $\dot{m}_c$ - masowe natężenie przepływu proszku w kg/s, $\dot{m}_g$ - masowe natężenie przepływu gazu w kg/s, r - promień lancy w m, r_c - promień wdmuchiwanej cząstki w m, ρ_g - gęstość gazu na wylocie z lancy w kg/m^3, ρ_l - gęstość ciekłego metalu w kg/m^3, h, V_b - odpowiednio wskaźnik wielkości pęcherzy i objętość pęcherzy na wylocie z lancy obliczone ze wzoru:

$$h = \left(\frac{6}{\pi}\right)^{1/3} \cdot V_b^{1/3}, \qquad V_b = 1{,}387 \cdot \dot{V}_N^{1,2} \cdot g^{-0,6}, \tag{6}$$

gdzie: $\dot{V}_N$ - objętościowe natężenie przepływu gazu m^3/s, g - przyspieszenie ziemskie w m^2/s.

Wielu autorów proponuje ten wzór w postaci uproszczonej [10]:

$$N_E = 0{,}75 \cdot \frac{\dot{m}_c h \rho_g}{\dot{m}_g d_c \rho_l}, \tag{7}$$

gdzie: d_c - średnica wprowadzanej cząstki.

Określono, że dla $N_E < 3$ mamy do czynienia z barbotażem, a gdy $N_E > 4{,}5$ - z przepływem strumieniowym. Przypadek, gdy $3<N_E<4{,}5$, określono jako stan przejściowy.

Do analizy strumienia Kimura wprowadził liczbę strumienia N_j, wyrażoną zależnością [11]:

$$N_j = 1{,}5 \frac{\dot{m}_c w^2 \rho_g}{\dot{m}_g w_c d_p \rho_l}, \tag{8}$$

gdzie: w, w_c - odpowiednio prędkość gazu i cząstek na wylocie z lancy w m/s.

Przyjęto dla wartości liczby N_j poniżej 1000 barbotaż (w zakresie tym obserwowano podczas badań zjawisko kawitacji powodujące nieciągłość strumienia), natomiast gdy $N_j > 1500$, jednolity strumień zapewnia dużą penetrację w głąb kąpieli metalowej. Zakres wartości $1000 < N_j < 1500$ opisuje stan przejściowy.

Z praktycznego punktu widzenia określenie wartości tej liczby jest uciążliwe ze względu na zawarte w niej takie czynniki, jak: gęstość gazu i metalu oraz wskaźnik wielkości pęcherzy. Dokonując analizy wpływu gęstości ρ_g i ρ_l na liczbę N_E stwierdzono, że w procesie nawęglania żeliwa i staliwa przy zastosowaniu sprężonego powietrza jako gazu nośnego (ze względu na ich małą zmienność) można przyjąć następującą zależność na obliczenie liczby $N_{E\,dos}$ [12, 13, 14]:

$$N_{Edos} = 1{,}466 \cdot 10^{-4} \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_g^{0.6} d_p}. \tag{9}$$

Podobnie jak poprzednio, po przyjęciu średnich wartości gęstości i przekształceniu zależności uzyskano równanie pozwalające na obliczenie wartości liczby strumienia $N_{j\ dos}$ dla warunków technicznych nawęglania żeliwa i staliwa przy płytkim zanurzeniu lancy:

$$N_{jdos} = 5{,}799 \cdot 10^{-4} \frac{\dot{m}_c w_7}{\dot{m}_g d_p}. \tag{10}$$

3. Szybkość nawęglania a parametry strumienia dwufazowego

W celu określenia wpływu parametrów strumienia dwufazowego na szybkość nawęglania przeprowadzono szereg eksperymentów wdmuchiwania sproszkowanego grafitu do pieców elektrycznych łukowych o pojemności 6 i 12 Mg [12, 13] . W trakcie każdej próby dokonywano pomiarów zarówno parametrów pneumatycznego przemieszczania, jak również składu chemicznego i temperatury ciekłego metalu oraz własności wdmuchiwanych cząstek grafitu.

Na podstawie uzyskanych wyników badań i obliczeń szybkości nawęglania i wielkości charakteryzujących strumień dwufazowy przeprowadzono analizę statystyczną, której wynikiem są następujące równania:

$$\frac{dC}{dt} = 9{,}7 \cdot 10^{-4} + 3{,}163 \cdot 10^{-3} N_E \tag{11}$$

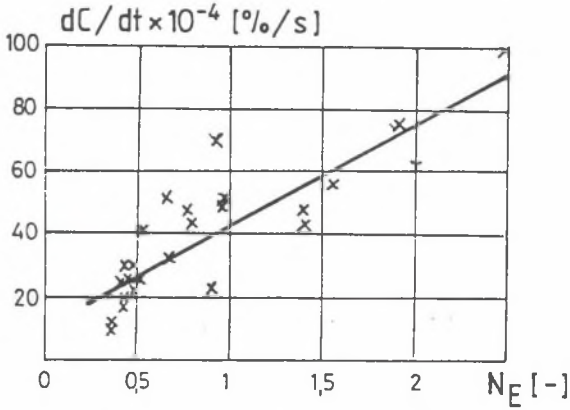
$\overline{dC/dt} = 0{,}00358$	F = 128,94	R = 0,8979
S = 24,03	$\alpha = 0{,}005$	w = 5,00,

gdzie: dC/dt - wartość średnia, F - test Fishera, α - poziom ufności, w - test wiarygodności dla zbioru i funkcji, R - współczynnik korelacji wielokrotnej, S - odchylenie standardowe w %.

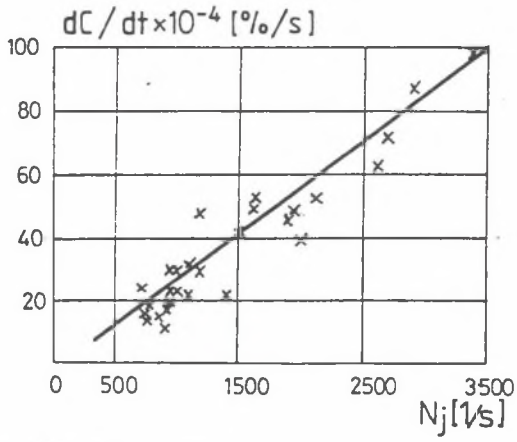
$$\frac{dC}{dt} = -1{,}321 \cdot 10^{-4} + 2{,}801 \cdot 10^{-6} N_j \tag{12}$$

$\overline{dC/dt} = 0{,}00375$	F = 205,81	R = 0,903
S = 21,06	$\alpha = 0{,}025$	w = 7,21

Graficzną interpretację równań przedstawiono na rys. 3 i 4.



Rys.3. Szybkość nawęglania w funkcji liczby przepływu N_E
Fig.3. Recarburisation rate in a function of the flow value N_E



Rys. 4. Szybkość nawęglania w funkcji liczby strumienia N_j
Fig. 4. Recarburisation rate in a function of the stream value N_j

Przedstawione zależności wykazują bardzo duży wpływ parametrów procesu wdmuchiwania na szybkość nawęglania. W obydwu przypadkach można stwierdzić wzrost szybkości nawęglania przy dużych natężeniach przepływu materiału i niskich natężeniach przepływu gazu oraz dla małych średnic wdmuchiwanych cząstek. Należy zdawać sobie sprawę z istnienia górnej granicy natężenia przepływu materiału, wynikającej z kinetyki rozpuszczania węgla w ciekłym metalu. W realizowanych eksperymentach w całym zakresie zmienności m_c nie zauważono spadku szybkości nawęglania przy jego wzroście. Liczba N_j ujmuje w swojej postaci także prędkość gazu, będącą bezpośrednią funkcją jego natężenia przepływu.

Powyższa analiza dotyczy oddziaływania tylko wielkości przepływowych urządzenia na szybkość nawęglania, nie ujmując parametrów ciekłego metalu, takich jak: początkowa zawartość

węgla C_p, temperatura T_p i masa ciekłego metalu m_m, istotnych dla analizowanego procesu. Na podstawie uzyskanych wyników badań i obliczeń przeprowadzono analizę statystyczną, w wyniku której uzyskano następujące zależności:

$$\frac{dC}{dt} = 1{,}436 \cdot 10^{-2} + 3{,}35 \cdot 10^{-3} N_E - 5{,}23 \cdot 10^{-6} T_p - 7{,}08 \cdot 10^{-7} m_m \tag{13}$$

$\overline{dC/dt} = 0{,}00379$ F = 83,31 R = 0,942

S = 18,1 $\alpha = 0{,}005$ w = 8,06

$$\frac{dC}{dt} = 1{,}56 \cdot 10^{-2} + 2{,}86 \cdot 10^{-6} N_j - 1{,}62 \cdot 10^{-4} C_p - 6{,}2 \cdot 10^{-6} T_p - 7{,}48 \cdot 10^{-7} m_m \tag{14}$$

$\overline{dC/dt} = 0{,}00393$ F = 125,1 R = 0,9695

S = 13,9 $\alpha = 0{,}005$ w = 14,79

Równania te potwierdzają obniżanie szybkości nawęglania przy wzrastającej zawartości początkowej węgla w ciekłym metalu. Nie uzyskano zakładanego związku z temperaturą. Jest to o tyle zastanawiające, że ze wzrostem T_p zwiększają się C_{max} i D_c powodując wzrost szybkości nawęglania. Prawdopodobnie w procesie wdmuchiwania węgla w strumieniu powietrza dodatkowa ilość dostarczonego tlenu w połączeniu z wysoką temperaturą powoduje wzrost szybkości wypalania węgla, co zmniejsza szybkość nawęglania.

Przedstawione równania pozwalają na dokładne obliczenie szybkości nawęglania w zależności od parametrów strumienia dwufazowego. Jest to zagadnienie bardzo istotne przy przemysłowym stosowaniu pneumatycznego nawęglania ciekłych stopów żelaza.

LITERATURA

1. Kosowski A.: Kinetyka nawęglania żeliwa w piecu indukcyjnym, Przegląd Odlewnictwa, nr 1-3, 1982.
2. Tochowicz S.: Biblioteka Metalurga - Wytapianie stali w piecach elektrycznych, Wyd. Śląsk, Katowice 1988.
3. Krzeszewski R.: Kinetyka rozpuszczania węgla w ciekłym żelazie, Prace Inst. Odl., nr 1-3, Kraków 1963.
4. Podrzucki Cz, Kalata Cz. : Metalurgia i odlewnictwo żeliwa, Wyd. Śląsk, Katowice 1971

5. Zhang X.D, Fruehan R.J.: Modeling of gas stirring in electric arc furnaces - eksperimental results of physical modeling, Electric Furnace Conf. Procedings, 1991.
6. Lee J.G, Tokuda M.: Penetration behavior of a single particle injected into liquid, Transactions ISIJ, 1988.
7. Komarov S.V, Itoh K, Sano M.: Mixing phenomena in a liquid bath stirred by gas jets trought side and inchined nozzles, ISIJ International, nr 7, 1993.
8. Chung S.H, Lange K.W.: Turbulence charakteristics of a gas - stirred steel bath outside the bubble plume, Steel research, nr 2, 1989.
9. Farias L, Robertson D.G.C.: Physical modelling of gas - powder injection into liquid metals, Electric Furnace Conf. Proc., Dallas 1986.
10. Farias L.R, Irons G.A.: A unified approach to bubbling - jeting phenomena in powder injection into iron and steel, Metallurgical Transaction B, nr 6, 1985.
11. Engh T.A, Larsen K.: Penetration of particle-gas jets into liquids, Ironmaking and Steelmaking, nr 6, 1979.
12. Janerka K.: Nawęglanie ciekłych stopów żelaza za pomocą urządzeń pneumatycznych, Rozprawa doktorska, Gliwice 1994.
13. Janerka K, Jura S, Piątkiewicz Z, Szlumczyk H.: Urządzenia do wdmuchiwania proszków do pieców metalurgicznych. Przegląd Odlewnictwa, nr 6, 1993.
14. Janerka K, Jura S, Piątkiewicz Z, Szlumczyk H.: Review of injection carburizing plants for liquid metal treatment in arc furnaces. II-nd In. Scient. Conf. Achievements in Mechanical and Material Engineering, ZN PAN, Gliwice 1993.

Recenzent: Dr hab. Józef Dańko
Profesor AGH

Wpłynęło do Redakcji 10.10.1997 r.

Abstract

This research work presents a problem of the recarburisation rate in condition of pneumatic injection of the powdered graphite into the liquid Fe-alloys . The stream character analyses were supplemented by a flow coefficient and a stream coefficient (equations 7 and 8). On

the ground of carried out analyses and experiences the modification of those values were made (equations 9 and 10). An important element of this work is binding a stream coefficient with a recarburization rate (equation 11 and 12 and 3 and 4). Significant interactions between pneumatic injection indexes and recarburisation parameters were determined . Especially in case of the recarburization process rate. This achievment enable to control that metallurgical process precisely.